

zando una prueba global, sin atribuir resultados a los individuos. Sin embargo, fallos ocasionales pueden llevar a que un análisis se realice junto con el predictor. Un elemento importante detrás del éxito del despliegue de este nuevo producto ha sido la inclusión de este factor humano.

Para hacer el mejor uso posible de la información disponible, los servicios de navegación aérea han aplicado una estrategia basada en las distintas categorías del boletín: las regulaciones están "calibradas" para tener un efecto progresivo sobre el tráfico.

Según fuentes no oficiales, durante la temporada 2001/2002 se llevó a cabo una prueba preliminar del tiempo de espera global para las situaciones fijadas. Se observó una mejora del 18 por ciento de este tiempo global, mientras que hubo un 30 por ciento más de casos de niebla. Esto muestra de manera objetiva la utilidad de estos boletines. Sin embargo, todavía hay que realizar un verdadero análisis de la relación coste-beneficio. Merece la pena mencionar aquí que la puesta en marcha de este método por Météo-France no supone ningún coste adicional a los usuarios, dado el principio según el cual es probable que estos últimos paguen el coste total del servicio regulador ofrecido, según la política adoptada por Francia en relación con las tarifas del tráfico aéreo. Siguiendo el objetivo establecido en los Reglamentos Técnicos de la OMM y en el

Anexo 3, párrafo 2.1.1 de la OACI, se considera que los boletines de PBV constituyen una parte integral del servicio regulador de la meteorología para la aviación, en el sentido de que la información meteorológica ofrecida ayuda "a contribuir a lograr la seguridad, la regularidad y la eficiencia" de la navegación aérea.

Naturalmente, el siguiente paso consiste en suministrar a los predictores herramientas para "ver" mejor las condiciones meteorológicas locales y con una mayor anticipación. Junto con los usuarios que financian el coste a través de la parte meteorológica de las tarifas de la navegación aérea, Météo-France está llevando a cabo en la actualidad un programa de investigación y desarrollo dedicado al aeropuerto de CDG en un intento de lograr algún progreso. Este proyecto se está realizando en estrecha cooperación con los usuarios. En 2003, el más alto organismo de consulta nacional de estos usuarios, que depende directamente de la autoridad del Ministerio de Transporte, pidió a Météo-France que desarrollara la realización de boletines de PBV y que los ampliara a los dos aeropuertos más importantes de Francia que sufren de problemas de visibilidad y altura de nubes: Orly y Lyon St. Exupéry. Météo-France ya ha iniciado el período necesario de formación profesional en estos aeropuertos y empezará a realizar los boletines tan pronto como sea posible.

337

## *Avisos de cizalladura del viento y de turbulencia en el Aeropuerto Internacional de Hong Kong*

---

Por Chi Ming SHUN\*

### **Introducción**

El Aeropuerto Internacional de Hong Kong (HKIA) se construyó sobre tierra ganada al mar al norte de la montañosa isla de Lantau, que tiene picos que alcanzan casi 1 000 m adyacentes a valles de hasta 400 m. La Figura 1 ilustra la situación del HKIA en relación con dicho terreno accidentado. Al nordeste del HKIA hay numerosas colinas menores con cimas que alcanzan los 600 m. En este entorno costero accidentado hay una amplia variedad de fenómenos meteorológicos que

pueden ocasionar cizalladura del viento en niveles bajos y turbulencia. Desde la apertura del HKIA, en julio de 1998, hasta finales de 2003, aproximadamente uno de cada quinientos vuelos con destino al aeropuerto o procedentes del mismo informó de una importante cizalladura del viento. A lo largo del mismo período, aproximadamente uno de cada 2 000 vuelos informó de turbulencia notable.

La cizalladura del viento es un cambio sostenido (es decir, que dura más de unos pocos segundos cuando la sufre la aeronave) de la dirección y/o de la velocidad del viento, y que provoca que varíe la sustentación del avión. Una disminución de la sustentación ocasio-

\* Observatorio de Hong Kong, Hong Kong, China.

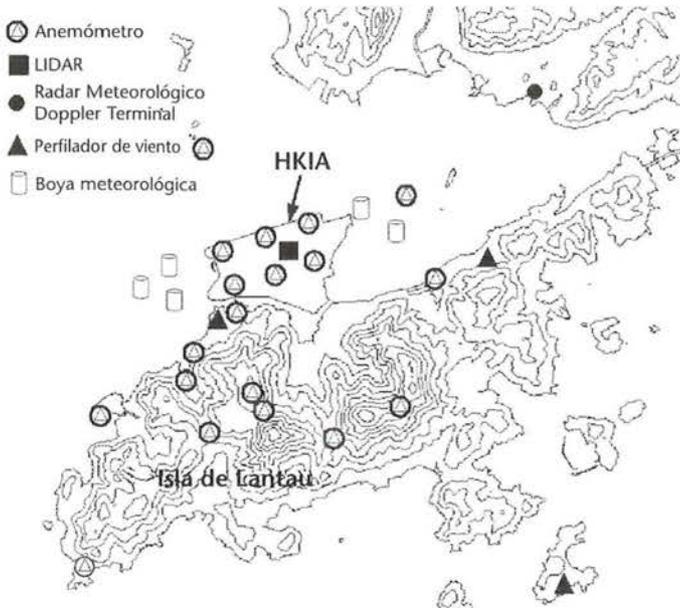


Figura 1 — Mapa del HKIA y de la zona vecina, con líneas de contorno cada 100 m

ará un descenso del avión por debajo de la trayectoria de vuelo buscada. Un cambio de 15 nudos o más en el viento de frente o de cola se considera cizalladura del viento importante, y puede requerir de una acción correctora oportuna y adecuada del piloto.

La turbulencia viene originada por un movimiento rápido e irregular del aire. Provoca sacudidas o traqueteos pero no suele influir en gran medida en la trayectoria de vuelo buscada de un avión. Sin embargo, con turbulencia violenta pueden producirse cambios abruptos en la altitud y en el comportamiento de la aeronave, de modo que el piloto puede perder momentáneamente el control de la misma. Para fines de información y de alertas, se considera importante la turbulencia moderada o la severa.

### Escenarios meteorológicos típicos

En el HKIA hay numerosas causas meteorológicas que originan cizalladura del viento y turbulencia. La más común es la interrupción del flujo de aire por parte de las colinas que rodean el aeropuerto. Las tormentas constituyen otra causa —ocurren en el HKIA 37 días al año por término medio— porque pueden ocasionar descensos violentos del aire en áreas restringidas y frentes de ráfaga. Las brisas marinas también ocasionan cizalladura del viento [1]. De manera típica, se produce una línea de cizalladura por

convergencia en niveles bajos entre la brisa marina del oeste y los vientos dominantes del este (Figura 2) Otra causa, aunque la menos frecuente, es el chorro invernal en niveles bajos [2]: una estrecha banda de vientos fuertes del noreste en la baja atmósfera ocasionando un aumento en el viento de frente en un avión que entra en el chorro y viceversa. Los cambios en el viento de frente se notan más cuando el avión se aleja que cuando se aproxima debido al gradiente más acusado de la trayectoria de despegue.

### Cizalladura del viento producida por el terreno

La mayor parte de la cizalladura del viento y de la turbulencia del HKIA viene ocasionada porque el aire atraviesa terreno accidentado, sobre todo por los vientos fuertes que atraviesan la isla de Lantau en primavera y durante

el paso de ciclones tropicales. Los informes de los pilotos y las observaciones con radares meteorológicos de alta resolución en el HKIA han arrojado luz sobre las características de la cizalladura del viento y de la turbulencia producidas por el terreno [3].

En situaciones ventosas, como el paso de un ciclón tropical, se observaron con el radar meteorológico bandas de aire de gran velocidad emergiendo de los valles de Lantau. Entre estas bandas de alta velocidad hay otras de menor velocidad a sotavento de las cimas. Una aeronave que atravesase estas bandas alternas de velocidad alta y baja puede encontrar pérdidas y aumentos del viento de frente en distintos puntos a lo

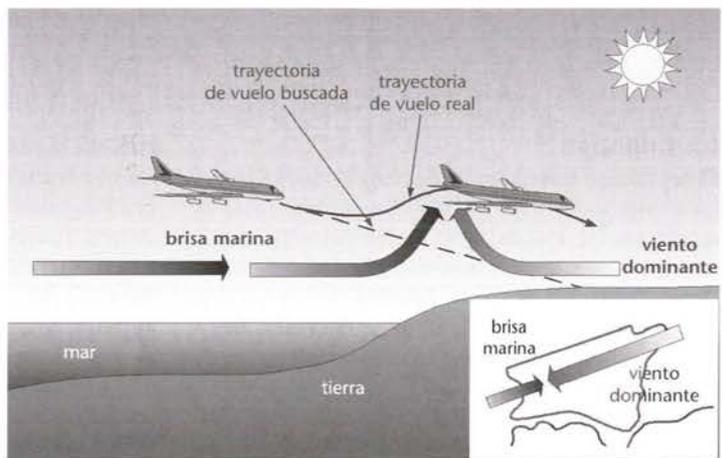


Figura 2 — Una brisa marina puede ocasionar cizalladura del viento debido a su convergencia con el viento dominante

largo de las trayectorias de aproximación y de salida. En la Figura 3 se muestra un diagrama esquemático que ilustra los fenómenos observados en relación con el terreno.

Cuando una aeronave se mueve de una banda de alta velocidad a una de menor velocidad, puede sufrir una disminución del viento de frente que ocasione una pérdida de sustentación. Este hundimiento se produce exista o no precipitación. La secuencia de un aumento del viento de frente seguida por una pérdida se parece muchas veces al modelo clásico de un descenso violento del aire en área restringida. En condiciones de humedad, como las que acompañan a los ciclones tropicales, este modelo ha despistado a los pilotos, pensando que la cizalladura del viento producida por el terreno estaba asociada a un descenso violento del aire en área restringida. Los pilotos esperaban que la cizalladura del viento disminuyera a medida que la precipitación se alejara, pero descubrieron que la cizalladura del viento producida por el terreno continuaba en la última parte del vuelo.

Se ha descubierto que los episodios de cizalladura del viento y de turbulencia producidos por el terreno también son transitorios y esporádicos. Lo ilustra muy bien la cizalladura del viento que se produjo el 17 de marzo de 2000, cuando vientos fuertes del sureste atravesaron la isla de Lantau. Los informes de los pilotos que aterrizaron sucesivamente en la misma pista a lo largo de un período de media hora alrededor de mediodía muestran que la mitad de los vuelos sufrieron cizalladura del viento. Una aeronave informó de una pérdida de 15 nudos, seguida, en un espacio de dos minutos, de otra que comunicó un aumento de entre 25 y 29 nudos. De manera sorprendente, dos minutos después una aeronave notificó que no había nada de cizalladura del viento, seguida de otro informe con aumento de 15 nudos. En otras palabras, incluso aunque las condiciones de humedad puedan permanecer similares en términos generales, algunos aviones encuentran cizalladura del viento o turbulencia mientras que otros no.

### Alertas de cizalladura del viento y turbulencia

El Observatorio de Hong Kong (HKO) ofrece servicios meteorológicos para la aviación al HKIA, incluido un servicio de alerta de cizalladura del viento y turbulencia para los vuelos de entrada y de salida. Entre los sensores meteorológicos para controlar las condicio-

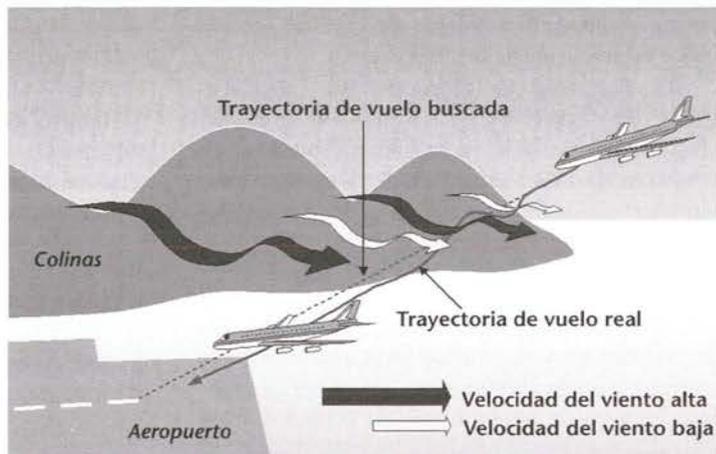


Figura 3 — La causa más común de cizalladura del viento en el HKIA es la configuración del flujo del aire producida por el terreno

nes de cizalladura del viento y de turbulencia en el HKIA y sus alrededores, se incluyen un radar meteorológico Doppler terminal (TDWR) y una red de anemómetros y de perfiladores de viento (véase en la Figura 1 la localización de estos sensores).

339

Un sistema de alerta de cizalladura del viento y turbulencia (WTWS), equipado con un conjunto de algoritmos de detección de tales fenómenos, procesa cada minuto los datos provenientes de dichos sensores meteorológicos. El sistema integra de manera automática las alertas de cizalladura del viento generadas por el TDWR y las alertas de cizalladura del viento y de turbulencia generadas por los algoritmos del WTWS en alertas conjuntas con el fin de que sean transmitidas a los pilotos por los controladores del tránsito aéreo.

Basándose en las observaciones de los sensores meteorológicos, el WTWS emite alertas de cizalladura del viento y turbulencia que se pueden producir dentro de las tres millas náuticas a partir de los umbrales de pista. Las alertas por cizalladura del viento se clasifican en dos niveles: “alerta de descenso violento del aire en área restringida” para una pérdida de 30 nudos o más en la velocidad del viento orientada según la pista acompañado de precipitación y “alerta de cizalladura del viento” para una pérdida de velocidad del viento orientada según la pista de 15 a 29 nudos o un aumento de 15 nudos o más.

Las alertas por turbulencia se basan en los mismos umbrales de intensidad que los adoptados internacionalmente para los informes automáticos de turbulencia de las aeronaves. Las genera un algoritmo que se basa primordialmente en las medidas de viento de anemómetros de superficie y en la parte superior de las colinas. Las alertas por turbulencia se clasifican en dos niveles: “turbulencia moderada” y “turbulencia severa”, referidas a una aeronave pesada como el

Boeing 747-400. Esto se basa en una cantidad llamada índice de disipación de la turbulencia.

Las alertas por cizalladura del viento y por turbulencia, complementadas por la evaluación del predictor y los informes reales de los pilotos, también se difunden en el servicio automático de información de la terminal (ATIS) a fin de ayudar a los pilotos a preparar con antelación su despegue o aterrizaje.

### Técnicas de alerta mejoradas

Para obtener una imagen más completa de la situación de cizalladura del viento en el HKIA, el HKO puso en marcha en el año 2000 ejercicios intensivos de informes de un mes de duración con la participación activa de las líneas aéreas, los pilotos y los controladores del tránsito aéreo. Uno de estos ejercicios se programó para que coincidiera con la temporada de primavera, época en la que es más frecuente la cizalladura del viento producida por el terreno, y el otro durante la estación de lluvias, cuando suelen producirse los tifones, las tormentas severas y los vientos fuertes.

Durante los ejercicios, se pidió a los pilotos que informaran de si habían encontrado o no cizalladura del viento. En total, el HKO recibió casi 10 000 informes de los pilotos, lo que suponía un tercio de todos los vuelos realizados durante los dos ejercicios intensivos de informes. Esto permitió que el HKO realizara un estudio exhaustivo del funcionamiento del servicio de alerta de cizalladura del viento así como el desarrollo adicional de técnicas de alerta de la misma.

Se desarrollaron técnicas de alerta de la cizalladura del viento mejoradas, utilizando un enfoque sistemático. Se reunieron los informes de cizalladura del viento de los pilotos, incluidos los que se recibieron durante los ejercicios intensivos de informes, para formar una base de datos cronológica sobre las condiciones reales de cizalladura del viento. Se analizaron los datos de los distintos sensores meteorológicos y los datos de vuelo obtenidos a bordo de aeronaves comerciales en los casos de cizalladura del viento.

Se estima que en la aparición de este fenómeno son importantes factores como la dirección y la velocidad predominantes del viento y las diferencias horizontales y verticales de los vientos en distintos puntos, así como el perfil vertical de temperatura de la atmósfera. Se combinaron juiciosamente estos parámetros para formar ecuaciones y diagramas de decisión con vistas a emitir alertas de cizalladura del viento bajo distintos escenarios meteorológicos. Posteriormente se probaron dichas ecuaciones y diagramas para obtener el rendimiento óptimo maximizando el número de alertas acertadas y minimizando el de falsas alarmas sobre la base de los informes de cizalladura del viento recibidos de los pilotos durante los ejercicios intensi-

vos. De esta manera se fijaron los umbrales para los parámetros meteorológicos importantes y se adoptaron ecuaciones y diagramas óptimos.

Después de comprobar de manera independiente las técnicas de alerta con respecto a los informes de cizalladura del viento de los pilotos recibidos fuera de los dos ejercicios intensivos de informes, confirmando así un rendimiento mejor, las nuevas técnicas se aplicaron a principios de 2001 con resultados esperanzadores. Más del 85 por ciento de los informes de cizalladura del viento de 2002 se habían cubierto con alertas de cizalladura del viento del HKO.

El funcionamiento del servicio de alertas de turbulencia también se examinó basándose en los informes provenientes de los pilotos durante los dos ejercicios intensivos de informes, existiendo aproximadamente la mitad de informes de turbulencia que de cizalladura del viento. En total, las alertas de turbulencia del HKO acertaron más del 90 por ciento de las veces.

### Nuevos desarrollos

Para mejorar la detección de la cizalladura del viento con tiempo seco, el HKO ha puesto en marcha varios equipamientos nuevos en los dos últimos años. Entre ellos se incluyen cinco boyas meteorológicas estratégicamente situadas al este y el oeste del aeropuerto, varios anemómetros en los valles sobre Lantau, y un sistema Doppler de impulsos de detección y localización por ondas luminosas (LIDAR) en el aeropuerto. La situación de estos equipos se indica en la Figura 1. Las boyas meteorológicas han demostrado ser muy eficaces a la hora de ampliar la cobertura de la red de anemómetros de superficie para detectar la cizalladura del viento ocasionada por las brisas marinas, los frentes de ráfagas y las líneas de cizalladura de niveles bajos producidas por el terreno. Se ha desarrollado en el Observatorio un nuevo algoritmo, conocido como Normas Mejoradas de Alerta de Cizalladura del Viento basada en Anemómetros (AWARE), para detectar la cizalladura del viento en todos los corredores de aproximación y salida basándose en la diferencia de la velocidad del viento orientado según la pista entre los anemómetros de esta red ampliada. El filtrado de datos también está activo para reducir las falsas alarmas ocasionadas por fluctuaciones de pequeña escala (turbulencia) de los vientos fuertes. Con el respaldo de las partes interesadas (es decir, líneas aéreas, pilotos, controladores del tránsito aéreo, autoridades de aviación civil) y teniendo en cuenta el mejor funcionamiento de AWARE en el Sistema de Alerta de la Cizalladura del Viento en Niveles Bajos (LLWAS), se ha previsto que AWARE sustituya al LLWAS del WTWS en la primera mitad de 2004.

Instalado a mediados de 2002, el sistema LIDAR Doppler de impulsos está situado estratégicamente en la azotea del complejo del control de tránsito aéreo (ATC)

entre las dos pistas paralelas (Figura 4). En esta ubicación, el LIDAR puede explorar los corredores de aproximación y de salida de ambas pistas. Con un funcionamiento según un principio parecido al del radar meteorológico Doppler, pero en una longitud de onda mucho más corta (2 micrómetros, en comparación con los pocos centímetros del radar meteorológico), el LIDAR puede recibir señales de retorno de aerosoles en aire claro. Actualmente está configurado para realizar barridos sectoriales en varios ángulos de elevación distintos, y también numerosos barridos verticales para permitir el control de las condiciones del viento hasta unas tres millas náuticas a partir de los respectivos umbrales de pista. Los datos del LIDAR se recogen de manera automática y se actualizan una vez cada dos minutos.

Desde su instalación, el LIDAR ha captado muchos episodios interesantes de cizalladura del viento en aire claro y ha facilitado a los predictores el control de dicho fenómeno. Aunque el LIDAR trabaja mejor con buen tiempo, también captó la cizalladura del viento y la turbulencia producidas por el terreno durante el paso de ciclones tropicales, tanto antes de que se aproximara la lluvia como después de que amainara. Un ejemplo de ello fue el paso de la tormenta tropical severa *Hagupit*, el 11 de septiembre de 2002, durante la cual numerosas aeronaves tuvieron que dar la vuelta a causa de la cizalladura del viento y de la turbulencia.

La Figura 5 muestra la velocidad radial Doppler del LIDAR desde un barrido de baja elevación cuando una aeronave tuvo que dar la vuelta para evitar encontrarse con cizalladura del viento. En la figura, los colores “cálidos” (es decir, el marrón, el amarillo y el rosa) representan velocidad radial alejándose del LIDAR mientras que los colores “fríos” (es decir, el verde, el azul y el violeta) re-



Figura 4 — Traslado del LIDAR a la azotea del Complejo del Control de Tránsito Aéreo, en el HKIA

presentan velocidad radial acercándose al LIDAR. Durante las aproximaciones al oeste del aeropuerto, pueden verse corrientes de aire alternas de alta y baja velocidad similares a las que se muestran en la Figura 3.

Continúan los estudios científicos para identificar rasgos del LIDAR de cizalladura del viento producida por el terreno en la estación de primavera, cuando se informa de la mayor parte de los episodios de cizalladura del viento. Se han identificado configuraciones de flujo producidas por el terreno, como la onda a sotavento (puede verse un ejemplo en la Figura 6), el salto hidráulico [4], las

bandas de velocidad, la línea de cizalladura y la supresión del vórtice. Se han formulado nuevas directrices de predicción basadas en estos descubrimientos para facilitar al predictor de aviación la emisión de alertas de cizalladura del viento específicas para el corredor y la pista basadas en los modelos de flujo de viento que revela el LIDAR.

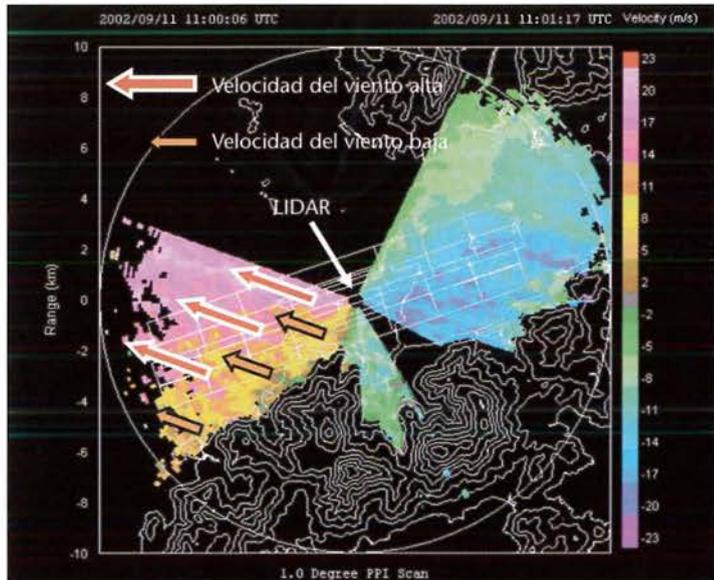


Figura 5 — Modelo de velocidad radial Doppler del LIDAR desde un barrido de 1,0° de elevación, que revela la presencia de bandas de velocidad alta y baja a sotavento de un terreno accidentado

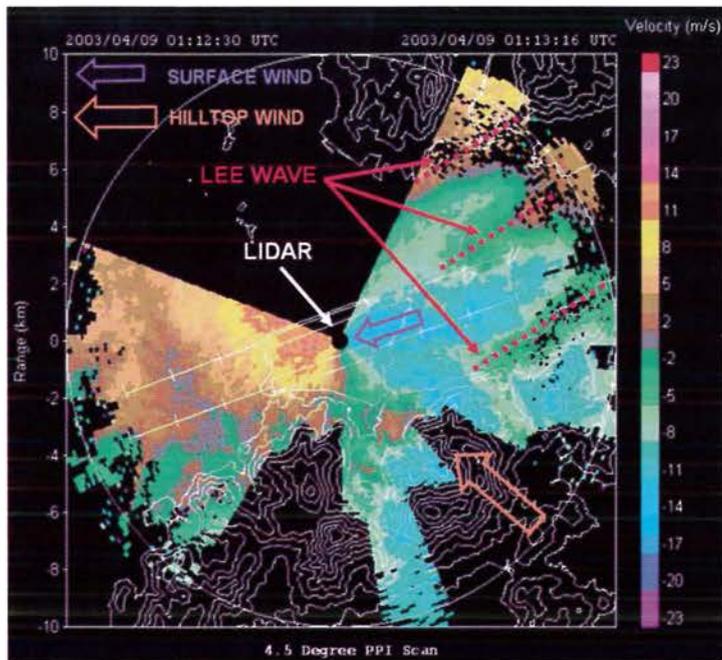


Figura 6 — Modelo de velocidad radial Doppler del LIDAR desde un barrido de 4,5° de elevación, que revela la presencia de una configuración de onda a sotavento al este del aeropuerto. Un avión que salió hacia el este unos minutos después informó de una pérdida de 15 nudos a una altura de unos 520 m

Para resumir, el LIDAR ha demostrado su capacidad para detectar la cizalladura del viento en aire claro cuando el haz del láser no está atenuado ni bloqueado por la precipitación y las gotas de agua. El LIDAR ha demostrado su utilidad para complementar al TDWR en la detección de la cizalladura del viento en un intervalo mayor de condiciones meteorológicas. En 2003, con el uso de datos adicionales de las boyas meteorológicas y el LIDAR por parte de los predictores aeronáuticos, el índice de aciertos de las alertas de cizalladura del viento del HKO alcanzó el 95

por ciento, siguiendo el índice de falsas alarmas su tendencia decreciente continua.

### Trabajo futuro

Los informes de los pilotos y las observaciones de radares meteorológicos de alta resolución de los últimos años han ayudado al HKO a mejorar su co-

nocimiento de las características de la cizalladura del viento producida por el terreno. Para promulgar este conocimiento y esta experiencia, el HKO realiza exposiciones orales (*briefings*) regulares y prepara material de información para las líneas aéreas, los pilotos y los controladores de tránsito aéreo. Un ejemplo es un folleto preparado conjuntamente por el HKO y la Federación Internacional de Asociaciones de Pilotos de Líneas Aéreas (IFALPA) sobre la cizalladura del viento y la turbulencia en Hong Kong, que está disponible impreso y en Internet (<http://www.hko.gov.hk/aviat/articles/WS-turb-booklet-web-ver.PDF>). El folleto se mantendrá actualizado para incorporar nuevos conocimientos sobre la cizalladura del viento y los últimos cambios en la alerta operativa.

En los dos últimos años, el LIDAR ha demostrado su capacidad para alertar de manera operativa de la cizalladura del viento en condiciones de aire claro. Los análisis

científicos de sus datos han mejorado nuestro conocimiento de los fenómenos de cizalladura del viento en el HKIA. Los predictores aeronáuticos del HKO ya hacen uso de los datos del LIDAR en las alertas operativas de cizalladura del viento. Se están desarrollando algoritmos automáticos de alerta de cizalladura del viento con el objetivo de integrar el LIDAR con el WTWS para seguir fortaleciendo el servicio global de alerta de cizalladura del viento del aeropuerto. También se está realizando investigación para explorar el uso de los datos del LIDAR para complementar el algoritmo existente basado en medidas de anemómetro para la detección de la turbulencia.

### Referencias

- [1] LEE, O. S. M. y C. M. SHUN, 2003: Observation of sea breeze interactions at and near Hong Kong International Airport, *Meteorological Applications*, Vol. 10, pp. 1-9.
- [2] LAU, S. Y. y S. T. CHAN, 2003: A crescent-shaped low-level jet as observed by a Doppler radar, *Weather*, Vol. 58 Número 8, pp. 287-290.
- [3] SHUN, C. M., S. Y. LAU y O. S. M. LEE, 2003: Terminal Doppler Weather Radar observation of atmospheric flow over complex terrain during tropical cyclone passages, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 42, pp. 1697-1710.
- [4] SHUN, C. M., C. M. CHENG y O. LEE, 2003: LIDAR observations of terrain-induced flow and its application in airport wind shear monitoring. Reunión de la Conferencia Internacional sobre Meteorología Alpina (ICAM) y del Programa Alpino Mesoescalar (MAP), Brig, Suiza, 19-23 de mayo de 2003.



### Windshear and Turbulence in Hong Kong - information for pilots



Figura 7 — Folleto conjunto del HKO y de la IFALPA sobre la cizalladura del viento y la turbulencia en Hong Kong